

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.032

引用格式:寇伟良,寇建村,刘倩,等.接种苔藓对短芒披碱草生长和土壤理化性质的影响[J].草地学报,2026,34(5):1921—1931

KOU Wei-liang, KOU Jian-cun, LIU Qian, et al. Effects of Moss Inoculation on the Growth and Soil Physicochemical Properties of *Elymus breviaristatus*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1921—1931

接种苔藓对短芒披碱草生长和土壤理化性质的影响

寇伟良¹, 寇建村¹, 刘倩¹, 张阳灿¹, 李钦瑶¹, 刘瑞琪², 刘淑敏², 杨文权^{2*}, 李希来³

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要:为探究高寒草甸中苔藓植物对常见牧草生长和土壤理化性质的影响,以短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)为材料,以不同的苔藓接种量(10 g·盆⁻¹, 15 g·盆⁻¹, 20 g·盆⁻¹)为处理,不接种苔藓为对照,在室内盆栽条件下研究接种苔藓对短芒披碱草生长及土壤理化性质的影响。结果表明:接种苔藓能促进短芒披碱草种子的萌发及植株的生长,在接种量为10 g·盆⁻¹时,短芒披碱草的种子萌发率、植株高度、地上和地下生物量、植株相对含水量分别提高了32.0%, 25.1%, 93.1%, 135.4%和37.4%。接种苔藓后土壤中可溶性有机碳、速效氮和微生物量碳氮含量不同程度地增加,其中,15 g·盆⁻¹的接种效果尤为明显,使土壤的脲酶、蔗糖酶、 α -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-木糖苷酶的活性分别增加了69.2%, 372.5%, 197.2%, 110.1%, 44.2%和105.6%。相关性分析表明,短芒披碱草生长指标与土壤理化性质之间存在显著相关性,表明接种的苔藓通过改变土壤理化性质进而影响短芒披碱草的生长。研究结果为利用苔藓植物修复退化高寒草甸的近自然修复措施提供了理论依据。

关键词:高寒草甸;苔藓植物;短芒披碱草;生长;土壤特性;生态修复

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1921-11

Effects of Moss Inoculation on the Growth and Soil Physicochemical Properties of *Elymus breviaristatus*

KOU Wei-liang¹, KOU Jian-cun¹, LIU Qian¹, ZHANG Yang-can¹, LI Qin-yao¹, LIU Rui-qi²,
LIU Shu-min², YANG Wen-quan^{2*}, LI Xi-lai³

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: In order to explore the effects of moss crust on the growth of common grass and soil properties in alpine meadow, *Elymus breviaristatus* was used as a material. And the effects of moss inoculation on the growth and soil properties of *E. breviaristatus* were studied under indoor pot conditions with different moss inoculation rates (10 g·pot⁻¹, 15 g·pot⁻¹, 20 g·pot⁻¹ and no moss inoculation as a control). The results showed that the inoculation of moss could promote the germination and growth of the plant. Under the condition of 10 g·pot⁻¹ inoculation, the germination rate, plant height, aboveground and underground biomass, and relative water content of plant were increased by 32.0%, 25.1%, 93.1%, 135.4% and 37.4%, respectively. The contents of soluble organic carbon, available nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in soil increased to different degrees after moss inoculation. The activities of urease, sucrase, α -1, 4-glucosidase,

收稿日期:2025-06-16;修回日期:2025-08-19

基金项目:国家自然科学基金重点支持项目(U23A20159, U21A20191);青海省科技厅科技援青合作专项项目(2023-QY-210)资助

作者简介:寇伟良(1998-),男,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地生态恢复研究, E-mail:KWL1998@nwfau.edu.cn; *通信作者
Author for correspondence, E-mail:wenquan05@sina.com

β -1, 4-glucosidase, cellobiohydrolase and β -1, 4-xylosidase in soil increased by 69.2%, 372.5%, 197.2%, 110.1%, 44.2% and 105.6%, respectively. The effect was particularly obvious under the treatment of $15\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ inoculation. The correlation analysis showed that there was a significant correlation between the growth index and soil properties, and moss inoculation affected the growth of the plant by changing soil properties. Therefore, in the restoration of degraded alpine meadow, it can be considered to inoculate an appropriate amount of moss to improve soil fertility and to promote vegetation recovery, which provides a theoretical basis for the near-natural restoration measures of alpine meadow using moss.

Key words: Alpine meadow; Bryophyte; *Elymus breviaristatus*; Growth; Soil properties; Ecological restoration

高寒草甸是青藏高原最主要的草地类型^[1], 具有独特的生物多样性和生态功能, 在水源涵养和水土保持等方面发挥着重要的作用^[2]。但是, 由于自然因素和人为活动等的影响, 近几十年来, 高寒草甸发生了不同程度的退化^[3]。退化的高寒草甸虽然通过人工草地建植、免耕补播和围栏封育等措施, 可以在短期内恢复草地覆盖面积和植被生物量^[4], 但恢复的草地容易发生二次、三次退化, 无法保持生产和生态功能的可持续性^[5]。近年来, 越来越多的研究者认为, 近自然修复方法才是退化生态系统最理想的修复方法^[6-7], 因此, 探索减缓高寒草甸退化及退化高寒草甸可持续修复的近自然修复方法一直是科学家研究的热点。

苔藓植物没有根茎叶的分化, 是最低等的高等植物^[8], 也是高寒草甸最常见的植物类群, 其形成的苔藓结皮在高寒草甸生态系统中具有重要的作用^[9]。苔藓与维管植物的关系并非单向促进, 而是随环境梯度与演替阶段而变化的动态平衡。在退化或者极端环境中, 苔藓常作为先锋群落率先定殖^[10], 并且分泌有机酸加速母岩风化, 促进土壤的形成^[11], 显著提升土壤养分与水分保持能力^[12], 促进维管植物的萌发与生长, 进而为其他植物群落的定居提供有利条件^[13], 利于退化生态系统的修复。有研究指出, 适量接种苔藓($700\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)可显著提高植被盖度、地上生物量及群落高度, 并同步提升土壤有机碳、全氮、有效磷和含水量, 降低pH值, 激活蔗糖酶与多酚氧化酶活性; 其机制在于苔藓结皮改善土壤结构、保水保肥, 并通过调控细菌与真菌群落结构促进养分循环^[14]。也有研究指出, 人工接种齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis*)和银叶真藓(*Bryum argenteum*)等可显著增加表层含水量、有机碳及微生物多样性, 同时促进草本定居, 径流减少超过30%, 泥沙流失降低超过80%^[15]。但也有研究结果发现, 随着植被盖度和生物量的增加, 系统由“资源限制”转向“资源竞争”。苔藓与维管植物开始争夺光照、水分和矿质元素, 尤其在高密度阶段,

苔藓层的遮阴与养分截留可能抑制幼苗生长, 甚至延缓演替进程^[16]。

目前, 苔藓结皮在高寒草甸生态系统中的作用逐渐被生态学家所认识^[8], 但是, 苔藓植物对高寒草甸牧草生长发育过程的影响以及机理尚不清楚。短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)作为高寒草甸的一种常见牧草, 其根系密集, 具有较强的抗寒性和抗旱能力, 是风沙区、高寒退化草地及盐碱地植被恢复的先锋物种, 在人工草地建植和生态修复等方面起着至关重要的作用^[17]。为此, 本研究以短芒披碱草为试验材料, 研究接种苔藓对短芒披碱草生长及土壤理化性质等的影响, 为验证苔藓结皮作为退化高寒草甸的近自然修复措施的可行性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

苔藓植物采自青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县高寒草甸。该地海拔高, 地势复杂, 受季风影响, 具有日照时间长、辐射强、热量低、气温日差大等特点, 为高原大陆性气候, 属高原亚寒带湿润气候区。年均温度 $-1.3\sim-1.6^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $597.3\sim 615.6\text{ mm}$, 草甸中存在大量苔藓植物, 主要包括土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)、细枝青藓(*Brachythecium buehneri*)和牛角藓(*Cratoneuron filicinum*)等。2023年8月, 将苔藓自地面轻轻采集后装入自封袋, 带回实验室置于冰箱冷藏层保存备用。短芒披碱草种子从青海牧草种子公司采购。试验所用营养土来源于品氏托普园艺(上海)有限公司。

1.2 试验设计

将采集到的苔藓植物置于干燥阴暗处晾干后, 人工剔除肉眼可见的植物残渣、土块、石子等杂质, 用粉碎机粉碎至 $1\sim 2\text{ mm}$ 的碎片, 混匀后备用。将

牧草种子用75%的乙醇浸泡10 min后,用无菌水冲洗5次,再用1%的次氯酸钠浸泡10 min,最后用无菌水冲洗5次备用。将营养土置于高温高压灭菌锅中灭菌三次作为培养基质。

选取口径12 cm、深度10 cm的塑料营养钵,装填营养土,并将装填深度控制在9 cm。表层土壤装填均匀平整后,每盆均匀放入30粒饱满均匀的短芒披碱草种子,将粉碎好的苔藓材料分别以10 g·盆⁻¹、15 g·盆⁻¹、20 g·盆⁻¹的标准均匀撒在营养土表面,确保完全覆盖后,以喷雾方式均匀润湿。待种子出苗后,定苗至25株。以不接种苔藓,种子表面只均匀撒施15 g营养土的短芒披碱草盆栽为对照,5次重复,共20盆。在人工气候箱中进行培养,培养条件:光照强度2000 lx,光周期14 h/10 h,温度20℃,空气湿度85%。

1.3 牧草指标测定

培养期间,每5 d向每套内置6个营养钵盆栽的塑料托盘里加1.2 L的水以供短芒披碱草和苔藓生长,试验进行35 d后结束。

发芽指标:发芽势=第3 d发芽种子数/供试种子数×100%;发芽率=第7 d发芽种子数/供试种子数×100%。

株高:每隔7 d测定一次短芒披碱草的株高,在盆中随机选取5株牧草,使用卷尺测量其地上高度,取5株高度的平均值作为牧草株高。

生物量、植株相对含水量及根冠比:将收获植株的地上部分和地下部分分开,称鲜重(电子天平精度为0.0001 g)。然后,先在105℃烘箱处理30 min,再在75℃下烘干,称量计算干重。用公式分别计算植株相对含水量、根冠比。

$$\text{植株相对含水量}(\%) = \frac{\text{鲜质量} - \text{干质量}}{\text{干质量}} \times 100\%$$

$$\text{根冠比}(\%) = \frac{\text{地下部鲜重}}{\text{地上部鲜重}} \times 100\%$$

牧草养分:将烘干粉碎的牧草样品过0.25 mm孔径筛后进行指标测定。全碳含量使用重铬酸钾外加热法测定,全氮含量使用凯氏定氮法进行测定,全磷含量使用钼锑抗比色法测定^[18]。

1.4 土壤理化指标测定

完成短芒披碱草地上部分采集后,将营养钵中土壤整体移出并平铺。先剔除土壤表层苔藓,随后

小心剥离植物根系,在根系与土壤分离后,精准采集0~5 cm深的土壤样本并进行阴干,按要求过筛后进行指标测定。pH用pH计(土水比1:2.5)测定,有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,可溶性有机碳用氯仿熏蒸法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,铵态氮和硝态氮采用KCl浸提法测定^[18]。

土壤酶:脲酶用靛酚蓝比色法测定,蔗糖酶用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法测定,利用微孔板荧光法测定 α -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-木糖苷酶^[19]。

1.5 数据处理

运用Microsoft Excel 2016进行试验数据整理,使用IBM SPSS Statistics 25.0软件进行统计分析,采用One-way ANOVA进行方差分析,用LSD法进行多重比较以及采用Pearson法进行相关性分析,并配合GraphPad软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 接种苔藓对短芒披碱草种子萌发和株高的影响

2.1.1 接种苔藓对种子萌发的影响 发芽势是测试种子的发芽速度和整齐度的重要指标,接种苔藓对短芒披碱草种子的萌发过程产生了不同程度的影响(图1a)。当苔藓接种量为10 g·盆⁻¹和15 g·盆⁻¹时,短芒披碱草种子发芽势较对照显著增加($P<0.05$),接种量为15 g·盆⁻¹时发芽势为32.2%,显著高于接种量为10 g·盆⁻¹和20 g·盆⁻¹的处理($P<0.05$)。

发芽率变化趋势与发芽势基本相同(图1b)。短芒披碱草在苔藓接种量为10 g·盆⁻¹和15 g·盆⁻¹时,其发芽率分别达到73.3%和71.1%,显著高于接种量为20 g·盆⁻¹的处理和对照($P<0.05$),对照和20 g·盆⁻¹的处理差异不显著。

2.1.2 接种苔藓对植株高度的影响 当苔藓接种量为10 g·盆⁻¹和15 g·盆⁻¹时,短芒披碱草的生长速度较快,植株高度显著($P<0.05$)高于对照和20 g·盆⁻¹的处理,在35 d,短芒披碱草株高在接种量10 g·盆⁻¹达到最高,为31.23 cm,显著($P<0.05$)高于其他接种量处理和对照,呈10 g·盆⁻¹>15 g·盆⁻¹>20 g·盆⁻¹和对照处理(图2)。

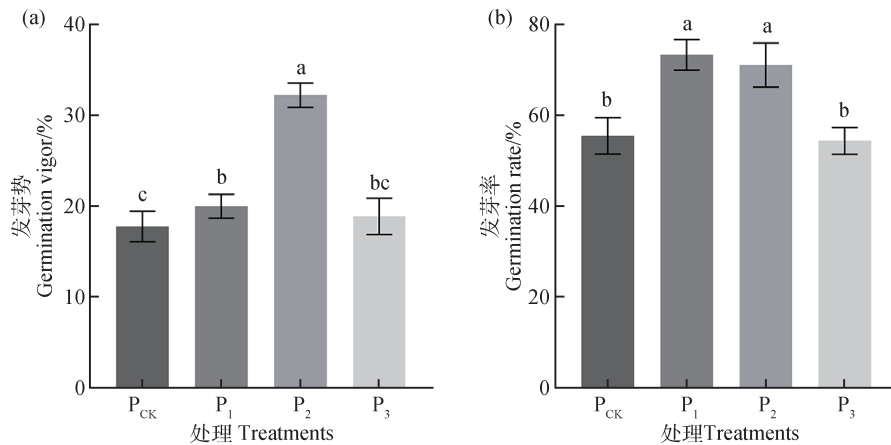


图1 接种苔藓对短芒披碱草种子萌发的影响

Fig. 1 Effect of moss inoculation on seed germination of *Elymus breviaristatus*

注: P表示短芒披碱草; 1, 2, 3分别表示3个不同的苔藓接种量, 即 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, CK表示对照。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Note: P indicates *Elymus breviaristatus*; 1, 2, and 3 indicate 3 different moss inoculation amounts, namely $10 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, $15 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, $20 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, and CK indicates control. Different small letters meant significant difference at 0.05 level. The same as below

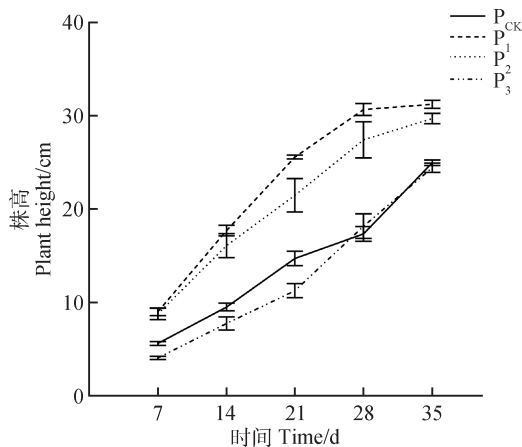


图2 接种苔藓对短芒披碱草株高的影响

Fig. 2 Effect of moss inoculation on the plant height of *Elymus breviaristatus*

2.2 接种苔藓对短芒披碱草功能性状的影响

苔藓接种量为 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时, 短芒披碱草的地上生物量显著 ($P < 0.05$) 高于接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的处理和对照 (图 3a); 而地下生物量在苔藓接种量为 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时最高, 显著高于接种量为 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的处理和对照 ($P < 0.05$) (图 3b)。短芒披碱草的根冠比在苔藓接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他处理和对照 (图 3c)。在苔藓接种量为 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 和 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的处理中, 短芒披碱草植株相对含水量显著 ($P < 0.05$) 高于接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的处理和对照 (图 3d)。

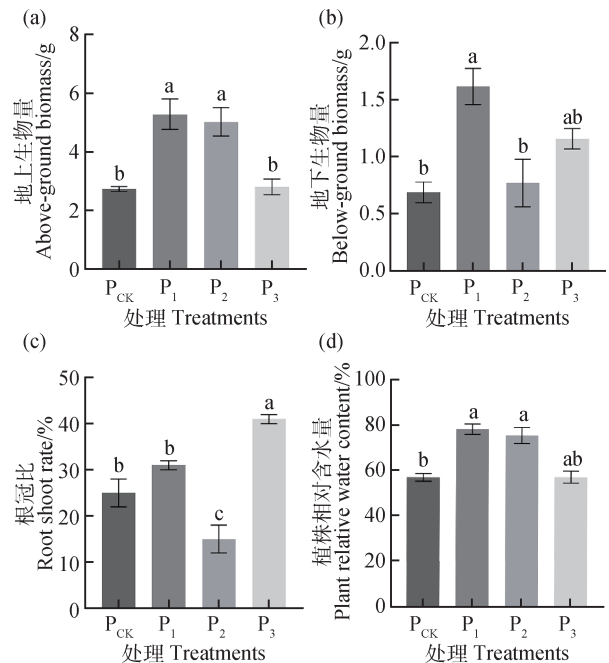


图3 接种苔藓对短芒披碱草功能性状的影响

Fig. 3 Effects of moss inoculated on functional traits of *Elymus breviaristatus*

2.3 接种苔藓对短芒披碱草碳氮磷含量的影响

适量接种苔藓可以促进短芒披碱草养分的提高。短芒披碱草叶片的全碳含量在接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他处理和对照 (图 4a), 而全氮和全磷含量均在接种量 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时达到最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他处理和对照 (图 4b, 图 4c)。

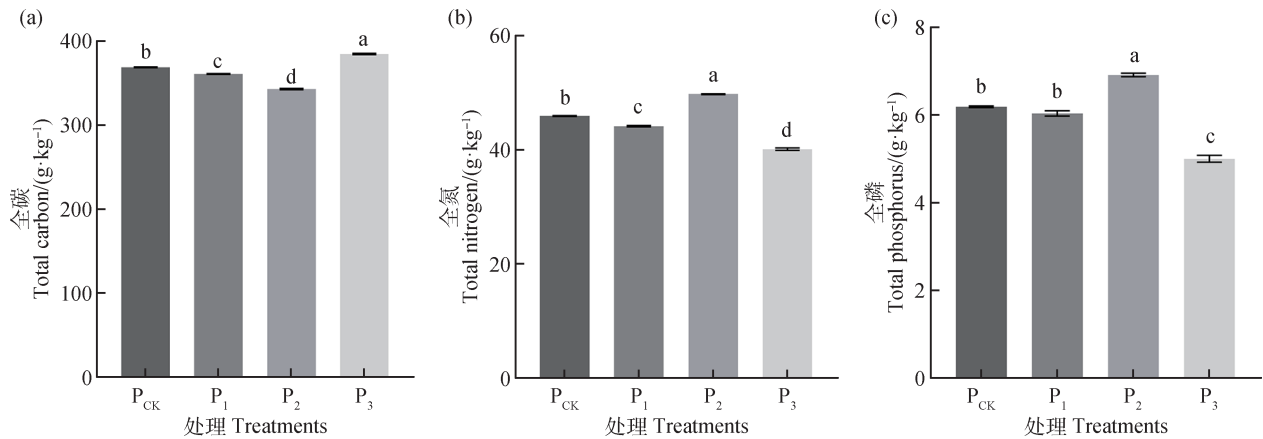


图4 接种苔藓对短芒披碱草养分含量的影响

Fig. 4 Effect of moss inoculation on nutrient content of *Elymus breviaristatus*

2.4 接种苔藓对土壤理化性质的影响

2.4.1 接种苔藓对土壤 pH 值的影响 接种苔藓可以在不同程度上提高短芒披碱草的土壤 pH 值,与对照相比,各处理 pH 值均显著高于未接种苔藓的对照 ($P < 0.05$),在接种量 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时最高,为 6.85 (图 5a)。

2.4.2 接种苔藓对土壤活性碳氮组分的影响 接种苔藓对种植短芒披碱草土壤中可溶性有机碳、硝态氮、铵态氮、微生物量碳氮含量有着不同程度的促进作用。具体而言,可溶性有机碳、硝态氮和微生物量碳均在接种量为 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的土壤中最,分别为 $189.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $423.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $512.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著 ($P < 0.05$) 高于其他处理和对照 (图 5d, 图 5f, 图 5h),而铵态氮和微生物量氮在接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的土壤中最,分别为 $31.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $38.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与其他接种量和对照相比,达显著性水平 ($P < 0.05$) (图 5g, 图 5i)。而未接种苔藓的对照土壤有机质、易氧化有机碳和全氮含量均为最高,分别为 $383.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $15.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且均显著 ($P < 0.05$) 高于 3 个处理 (图 5b, 图 5c, 图 5e)。

2.4.3 接种苔藓对土壤酶活性的影响 除过氧化氢酶活性在苔藓接种量为 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的短芒披碱草土壤中最,显著 ($P < 0.05$) 高于对照外,脲酶、蔗糖酶和 4 种水解酶活性均为接种量 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 的土壤中最,且显著 ($P < 0.05$) 高于其他接种量处理和对照。其中,脲酶、蔗糖酶、 α -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-木苷酶活性变化趋势一致 (表 1)。说明接种苔藓对种植短芒披碱草的土壤酶活性均有着不同程度的促进作用。

2.5 短芒披碱草生长特征与土壤因子的相关性分析

对短芒披碱草生长特征和土壤活性碳氮组分及土壤中酶活性进行 Mantel 相关性分析。结果表明,短芒披碱草株高与可溶性有机碳呈极显著相关性 ($P < 0.01$),与微生物量碳和 β -1,4-葡萄糖苷酶呈显著相关性 ($P < 0.05$);地上生物量与可溶性有机碳、微生物量碳和过氧化氢酶呈极显著相关性 ($P < 0.01$),与 β -1,4-葡萄糖苷酶呈显著相关性 ($P < 0.05$);地下生物量与有机质和硝态氮呈极显著相关性 ($P < 0.01$),与 pH 和全氮呈显著相关性 ($P < 0.05$) (图 6)。

表1 接种苔藓对土壤酶活性的影响

Table 1 Effect of moss inoculation on soil enzyme activity

处理 Treatments	脲酶 UE/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	蔗糖酶 SC/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶 CAT/ ($\text{ml} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	α -1,4-葡萄糖苷 酶 $\alpha\text{G}/$ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	β -1,4-葡萄糖苷酶 BG/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	纤维二糖水解酶 CBH/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	β -1,4-木苷酶 XYL/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
P _{CK}	73.57 $\pm$ 1.13 ^d	1022.38 $\pm$ 81.90 ^d	3.23 $\pm$ 0.34 ^c	160.90 $\pm$ 0.40 ^d	667.30 $\pm$ 33.00 ^d	328.20 $\pm$ 0.30 ^d	176.00 $\pm$ 0.35 ^d
P ₁	92.64 $\pm$ 3.51 ^c	4049.69 $\pm$ 91.03 ^c	6.99 $\pm$ 0.29 ^a	292.5 $\pm$ 0.55 ^c	1026.47 $\pm$ 0.58 ^b	380.89 $\pm$ 0.11 ^c	240.76 $\pm$ 0.58 ^c
P ₂	124.49 $\pm$ 2.37 ^a	4830.31 $\pm$ 60.98 ^a	4.44 $\pm$ 0.30 ^b	478.10 $\pm$ 0.41 ^a	1402.26 $\pm$ 0.53 ^a	473.39 $\pm$ 0.27 ^a	361.95 $\pm$ 0.51 ^a
P ₃	105.23 $\pm$ 2.42 ^b	4408.74 $\pm$ 56.35 ^b	2.71 $\pm$ 0.21 ^c	312.10 $\pm$ 0.36 ^b	926.39 $\pm$ 0.31 ^c	383.88 $\pm$ 0.21 ^b	251.81 $\pm$ 0.27 ^b

注:同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level

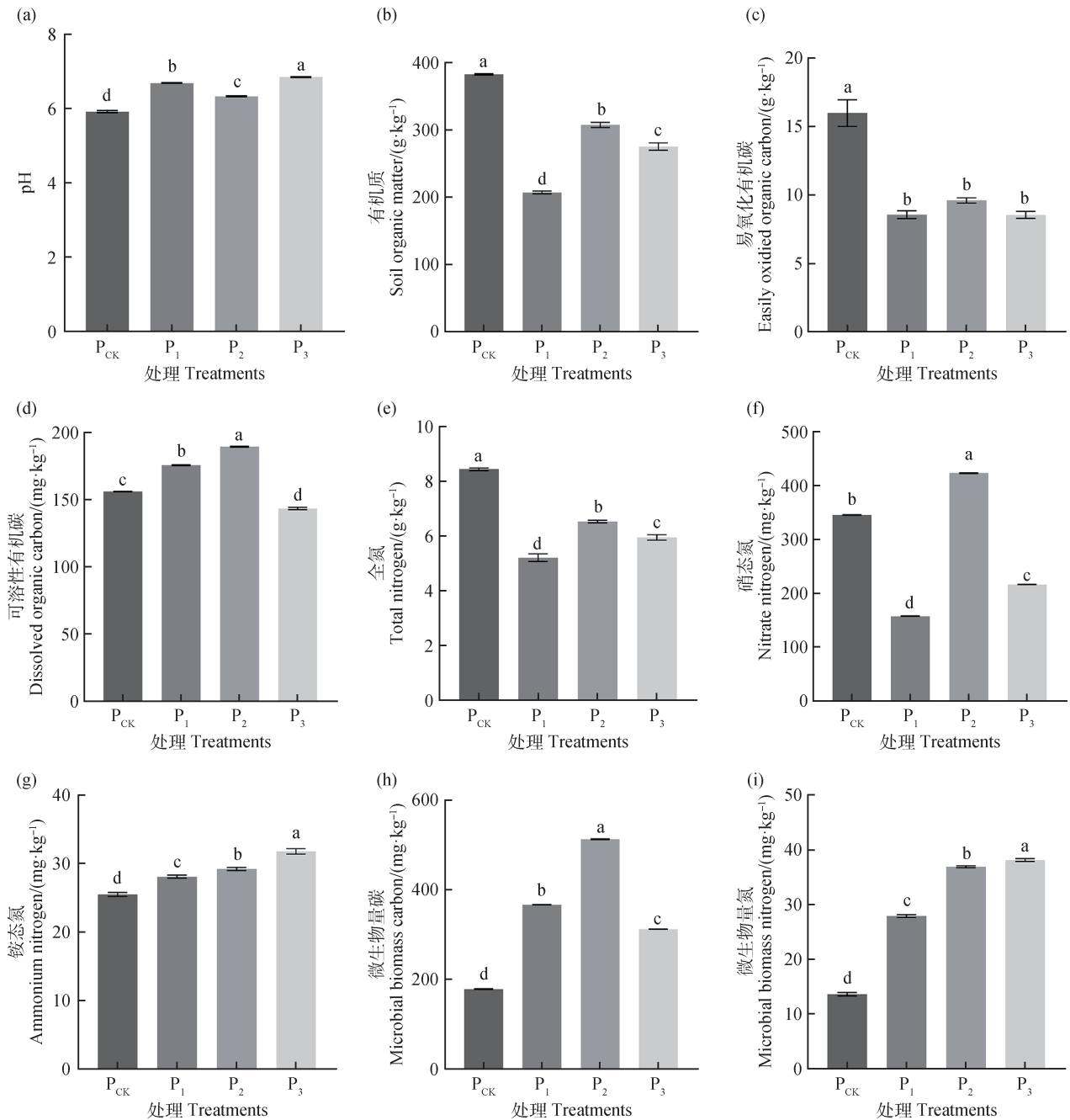


图 5 接种苔藓对土壤 pH 及活性碳氮组分的影响

Fig. 5 Effect of moss inoculation on soil pH and active carbon and nitrogen components

3 讨论

3.1 接种苔藓对短芒披碱草种子萌发及植株生长的影响

接种苔藓后,短芒披碱草的发芽势和发芽率在 $10\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、 $15\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 接种量下显著提高,在 $20\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 处理下与对照差异不显著。说明适量而非过量的苔藓接种可以为短芒披碱草种子提供一个更为适宜的微环境,有利于牧草种子早期的萌发。这种

促进作用可能是因为苔藓的低剂量接种有利于空气中的水分下渗到土壤,为种子萌发创造适宜的微环境,从而有利于维管植物种子萌发^[20]。而接种高剂量苔藓后效果不显著可能与下面的这些原因有关:首先,苔藓植物对种子的萌发可能具有化感作用,其分泌物浓度达到一定程度可对种子萌发起到抑制作用^[21],本研究中,虽没有出现显著的抑制作用,但是呈现出下降的趋势;其次,当土壤表面苔藓的盖度和厚度较大时,会形成一层致密的覆盖层,

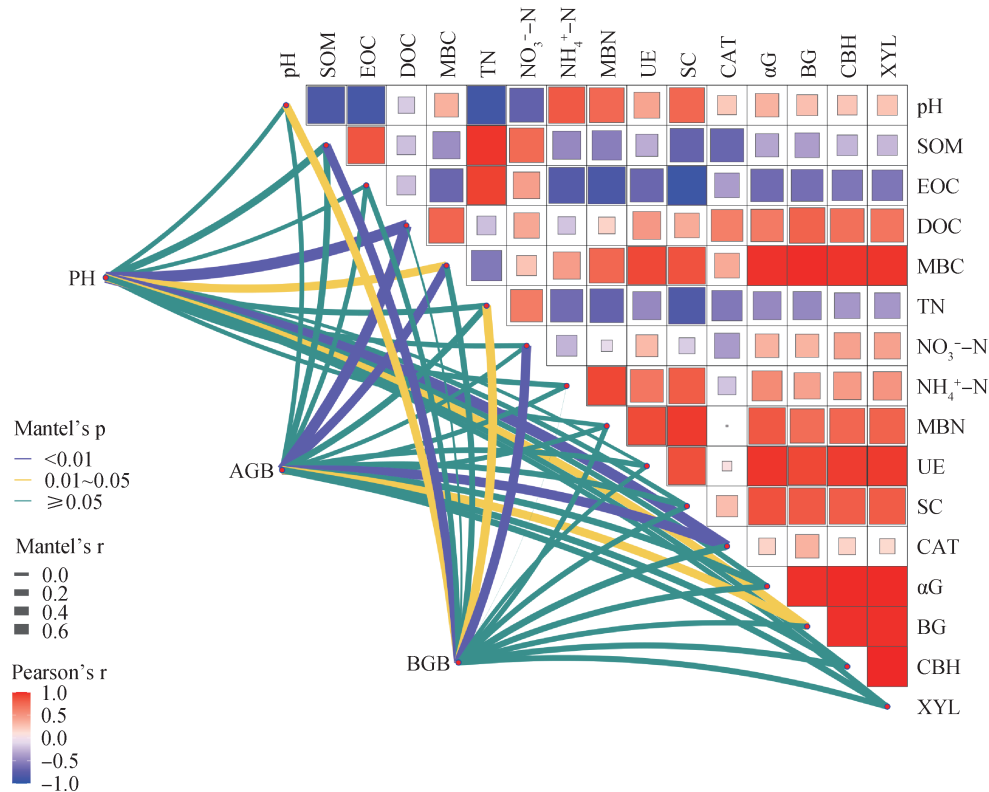


图6 短芒披碱草生长特征与土壤因子的相关性

Fig. 6 Relationship between growth characteristics and soil factors of the *Elymus breviaristatus*

注:PH表示株高;AGB表示地上生物量;BGB表示地下生物量;SOM表示有机质;EOC表示易氧化有机碳;DOC表示可溶性有机碳;TN表示全碳; NO_3^- -N表示硝态氮; NH_4^+ -N表示铵态氮;MBC表示微生物量碳;MBN表示微生物量氮;UE表示脲酶;SC表示蔗糖酶;CAT表示过氧化氢酶; α G表示 α -1,4-葡萄糖苷酶;BG表示 β -1,4-葡萄糖苷酶;CBH表示纤维二糖水解酶;XYL表示 β -1,4-木苷酶

Note: PH indicates plant height; AGB indicates above-ground biomass; BGB indicates below-ground biomass; SOM indicates soil organic matter; EOC indicates easily oxidized organic carbon; DOC indicates dissolved organic carbon; TN indicates total nitrogen; NO_3^- -N indicates nitrate nitrogen; NH_4^+ -N indicates ammonium nitrogen; MBC indicates microbial biomass carbon; MBN indicates microbial biomass nitrogen; UE indicate urease; SC indicates sucrase; CAT indicates catalase; α G indicates α -1, 4-glucosidase; BG indicates β -1, 4-glucosidase; CBH indicates cellobiohydrolase; XYL indicates β -1, 4-xylosidase

阻碍水分入渗^[22],导致土壤水分分布不均,从而降低种子萌发的适宜性,进而降低维管植物的发芽率^[16]。因此,苔藓植物对牧草的作用和接种量有关,但具体的影响机理还需要进一步研究。

本研究中,除接种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 中短芒披碱草生长高度低于对照外,其他接种量处理下,短芒披碱草最后的生长高度都高于对照,可能是因为适量的接种苔藓后,苔藓植物通过增加土壤水分、土壤有机质和养分含量,从而促进幼苗的生长^[23],对禾本科植物生长具有促进作用^[24]。当苔藓盖度过高时,苔藓结皮中的微生物会与维管植物产生养分的竞争,从而抑制维管植物的增长^[25]。此外,高剂量接种苔藓可能产生高浓度的化感物质,从而抑制牧草的生长,尤其是在苔藓覆盖较厚或牧草与苔藓竞争养分的情况下^[26],这也为本研究中短芒披碱草接

种量为 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 时生长高度低于对照作出解释。

有研究指出,植物的生物量在有苔藓结皮的土壤上高于无结皮的土壤,结皮后植物生物量是无结皮时生长的2倍^[27]。本研究中,接种苔藓后短芒披碱草的地上生物量和地下生物量均有不同程度的提高,这与已有的研究结果相似。此外,生物量的形成和积累受到多种因素的影响,如水分状况、土壤条件和养分供应等,而短期接种苔藓不足以对土壤养分状况等产生显著影响,从而不会间接对生物量产生显著影响。短芒披碱草根冠比在接种苔藓后有所提高,可能原因是苔藓结皮中的化感物质通过干扰种子内部的代谢活动,抑制胚根和胚芽的伸长^[21]。

3.2 接种苔藓对短芒披碱草养分含量的影响

苔藓的存在能够富集土壤中的养分,改善土壤

的理化性质^[28]。研究表明,苔藓能通过改善土壤碳氮含量和理化性质,间接影响牧草的全碳和全氮含量。苔藓结皮层的高有机碳含量和良好的土壤结构为牧草生长提供了更丰富的碳源、氮源以及更适宜的生长环境^[29]。苔藓结皮虽然对土壤全磷的影响相对较小,但对磷素的有效性的影响较为显著,在黄土高原生物结皮的研究指出,苔藓结皮的存在显著提高了土壤速效磷含量,进而促进植物对磷的吸收^[30]。在本研究中,短芒披碱草全碳含量在接种量 $20\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 下最高,全氮和全磷含量在接种量 $15\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 下最高,显著高于对照(图 4b,图 4c),这与前人研究结果相似^[31],即苔藓的存在可提高牧草的全碳、全氮和全磷养分含量。植物在不同的生长阶段对营养元素的需求是动态变化的^[32],本研究中,短芒披碱草地上生物量在 $10\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 下最高,而全碳总含量也在该接种量下最高, $15\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 下次之,可能原因就是短芒披碱草在 $10\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 下生长速度快,生物量大,而随着生物量的积累,体内碳元素会被“稀释”,导致其相对含量下降^[33]。此外,不同苔藓对养分的影响可能也有所不同,有些可能会促进养分循环,而有些可能会竞争养分^[34]。

3.3 接种苔藓对土壤理化性质和酶活性的影响

苔藓的接种及结皮的形成会对土壤理化性质产生一定的影响,能够显著降低土壤的 pH 值,使其略呈酸性^[35]。这种变化主要是由于苔藓植物在生长过程中分泌有机酸^[11],这些有机酸可以中和土壤中的碱性成分。本研究中,接种苔藓后的短芒披碱草土壤 pH 均升高,可能原因是苔藓植物分泌的有机酸主要用于加速植物本身难以利用的土壤矿质元素转换形态^[36],使其有利于植物的吸收,因此有机酸被消耗,土壤 pH 呈现出升高的趋势。此外,苔藓的接种可以增加土壤中养分含量,这些养分的积累可能改变土壤的化学性质,进而影响 pH 值。如有研究指出,在苔藓生长发育过程中,土壤 pH 值与有机质含量呈线性负相关^[37],在本研究中,土壤有机质含量在接种苔藓后下降,也证明了这一现象。

生态系统中,苔藓的存在对土壤碳和氮循环有着积极影响^[8],对有机质含量的影响相对较复杂^[11],土壤中各组分的活性有机碳分布特征是土壤有机质矿化分解与转化积累之间平衡的结果,受到诸多因素的影响。多数研究发现,苔藓结皮可以显著提高土壤有机质等养分含量,而在本研究中,接种

苔藓后有机质和易氧化有机碳含量均降低,可能是因为本试验中苔藓需要足够的养分满足结皮过程中的快速生长,其接种激发了微生物活性,加速了有机质的分解,导致有机质含量降低^[38]。同时,也促进土壤碳转化为可溶性有机碳^[39],土壤中可溶性有机碳的含量增加。另外,我们需要考虑野外生长多年形成的结皮和本研究盆栽试验短期形成的结皮对土壤的影响存在差异,因为本研究持续 35 d,苔藓结皮的残体来不及转化为土壤中的有机碳等养分,而天然草地中苔藓结皮残体的腐解是速效养分和有机碳积累的重要原因。土壤微生物量碳氮是土壤能量流动和养分转化的主要参与者,深刻影响着土壤养分转化和可持续累积^[40]。本研究中,微生物量碳氮含量在接种苔藓后均得到不同程度的提升,这与已有研究结果基本一致^[41]。此外,碳水解酶活性与可溶性有机碳和微生物量碳含量显著正相关^[42],这也印证了本研究结果。

土壤酶来源于微生物、植物根系和动植物,常被作为土壤生态健康的生物指标^[43],但生物结皮对土壤酶活性的影响主要集中在土壤表层^[24]。土壤肥力与蔗糖酶活性正相关,脲酶是土壤中最活跃的有机成分之一,与土壤中氮素循环密切相关,过氧化氢酶促进土壤中过氧化氢的分解,其活性和土壤有机质含量有关^[44]。有研究指出,生物结皮土壤中的过氧化氢酶、脲酶、脱氢酶和蔗糖酶活性均高于无结皮的裸土^[45]。本研究中,对种植短芒披碱草的土壤而言,除过氧化氢酶在接种量为 $20\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 时低于对照外,其他酶活性均为各个接种苔藓处理的高于未接种苔藓的对照,这与前人研究结果基本一致。可能是因为接种苔藓后土壤养分含量和水分发生改变,从而为酶促反应提供相对丰富的底物^[46],同时改变了结皮下层土壤微生物多样性,影响土壤微生物分泌酶的能力,继而影响土壤酶活性^[47]。

土壤碳水解酶活性是土壤有机质矿化、土壤碳组分变化的重要影响因子^[48],其活性大小与土壤固碳功能密切相关。有研究指出,生物结皮能够提高土壤碳水解酶的活性^[49],本研究得出相似结果。本研究中,种植短芒披碱草的土壤中脲酶、蔗糖酶、 α -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-木苷酶活性在接种苔藓后均显著升高,且均在接种量为 $15\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 时达最高值,其中,除 β -1,4-葡萄糖苷酶外,其他酶活性在各个接种量下

变化趋势一致,这可能是因为苔藓结皮通过创造合适的土壤温度和湿度,以及土壤养分等,来增加土壤酶活性^[50]。

4 结论

接种苔藓可促进短芒披碱草种子的萌发和生长,提高土壤酶活性和部分养分含量。在接种量 $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 下,其发芽率、株高、生物量、植株相对含水量最高;接种量 $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 提高了短芒披碱草全碳含量,而接种量 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 提高了全氮和全磷含量;接种苔藓提高了土壤中脲酶、蔗糖酶以及4种碳水解酶活性,且均在接种量 $15 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 下活性达到最高,也提高了土壤可溶性有机碳、速效氮和微生物量碳氮含量。短芒披碱草生长特征与土壤因子之间存在显著相关性。因此,在退化高寒草甸修复中可以根据目标导向灵活选用苔藓植物接种浓度以促进土壤和植被恢复,从而为利用苔藓植物的高寒草甸近自然修复措施提供理论依据。

参考文献

- [1] 李军豪,杨国靖,王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报,2020,31(6):2109-2118
LI J H, YANG G J, WANG S P. Vegetation and soil characteristics of degraded Alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2109-2118
- [2] LIU H Y, MI Z R, LIN L, et al. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4051-4056
- [3] 张浩林,李娅芸,胡洋,等. 不同退化程度高寒草地土壤微生物残体和球囊霉素积累及其对有机碳的贡献[J]. 应用生态学报,2025,36(3):911-917
ZHANG H L, LI Y Y, HU Y, et al. Accumulation of microbial necromass and glomalin and their contribution to organic carbon in Alpine grasslands with different degradation degrees [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 911-917
- [4] 段成伟,李希来,柴瑜,等. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J]. 生态学报,2022,42(18):7652-7662
DUAN C W, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded Alpine meadow in the Yellow River Source [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7652-7662
- [5] VANDER MUNSBRUGGE K, BISCHOFF A, SMITH B. A question of origin: Where and how to collect seed for ecological restoration [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(4): 300-311
- [6] BIRKART L V, LÓPEZ PORTILLO HURTADO J A, ALVAREZ-FILIP L. Enhancing structural connectivity through coral restoration by adopting a landscape ecology perspective [J]. Landscape Ecology, 2025, 40(5): 99
- [7] 张克荣,张小全,李潜,等. 退化生态系统近自然精准修复——基于自然的解决方案[J]. 植物科学学报,2023,41(6): 751-758
ZHANG K R, ZHANG X Q, LI Q, et al. Near-natural precise restoration of degraded ecosystems: nature-based solutions [J]. Plant Science Journal, 2023, 41(6): 751-758
- [8] SLATE M L, SULLIVAN B W, CALLAWAY R M. Desiccation and rehydration of mosses greatly increases resource fluxes that alter soil carbon and nitrogen cycling [J]. Journal of Ecology, 2019, 107(4): 1767-1778
- [9] LIU L C, LIU Y B, HUI R, et al. Recovery of microbial community structure of biological soil crusts in successional stages of Shapotou desert revegetation, northwest China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 107: 125-128
- [10] WU Y, RAO B, WU P, et al. Development of artificially induced biological soil crusts in fields and their effects on top soil [J]. Plant and Soil, 2013, 370(1-2): 115-124
- [11] ELDRIDGE D J, GREENE R S B. Microbiotic soil crusts—a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(3): 389-415
- [12] BU C F, ZHAO Y, HILL R L, et al. Wind erosion prevention characteristics and key influencing factors of bryophytic soil crusts [J]. Plant and Soil, 2015, 397(1-2): 163-174
- [13] 马录花,孟宪超,王贵强,等. 苔藓结皮短期添加对青藏高原人工草地植被和土壤的影响[J]. 草地学报,2024, 2(5): 1348-1358
MA L H, MENG X C, WANG G Q, et al. Effects of short-term addition of moss crusts on vegetation and soil of artificial grassland in the Tibetan Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1348-1358
- [14] 马录花,孟宪超,王贵强,等. 藓类结皮接种对三江源高寒草甸土壤性状和微生物的影响[J]. 植物生态学报,2025,49(1): 173-188
MA L H, MENG X C, WANG G Q, et al. Effects of moss crust inoculation on soil properties and microbial communities in Alpine meadow in Sanjiangyuan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2025, 49(1): 173-188
- [15] 赵洋,连煜超,赵燕翹,等. 生物土壤结皮在防沙治沙中的应用综述[J]. 中国沙漠,2025,45(3): 31-38
ZHAO Y, LIAN Y C, ZHAO Y Q, et al. Review on the application of biological soil crusts in the prevention and control of aeolian desertification [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3): 31-38
- [16] 孙华方,李希来,金立群,等. 生物土壤结皮对黄河源区人工草地植被与土壤理化性质的影响[J]. 草地学报,2020, 28

- (2): 509-520
- SUN H F, LI X L, JIN L Q, et al. Effects of biological soil crusts on the physical and chemical properties of soil and vegetation of artificial grassland in the Yellow River source zone[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 509-520
- [17] 何永涛, 胡宇, 段慧荣, 等. 披碱草属4个牧草品种苗期抗旱性综合评价[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(1): 77-87
- HE Y T, HU Y, DUAN H R, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of four *Elymus* varieties at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(1): 77-87
- [18] YING B, XIAO S Z, XIONG K N, et al. Comparative studies of the distribution characteristics of rocky desertification and land use/land cover classes in typical areas of Guizhou province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 631-645
- [19] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315
- [20] 孙福海, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J]. *草业学报*, 2021, 30(6): 54-63
- SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Effects of biological soil crusts in different developmental stages on soil water permeability and water holding capacity in the Chinese Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(6): 54-63
- [21] 王宁, 刘俊娥, 周正朝. 生物土壤结皮对种子萌发和幼苗建植的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7464-7474
- WANG N, LIU J E, ZHOU Z C. Research progress on the effect of biological soil crust on seed germination and seedling establishment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7464-7474
- [22] 李雨晨, 平原, 瀚腾辉, 等. 红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 71-77
- LI Y C, PING Y, TAN T H, et al. Effects of biocrust with different coverage on water infiltration in red soil hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 71-77
- [23] 李雪华, 李晓兰, 蒋德明, 等. 干旱半干旱荒漠地区一年生植物研究综述[J]. *生态学杂志*, 2006(7): 851-856
- LI X H, LI X L, JIANG D M, et al. Annual plant species in arid and semi-arid desert regions: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 851-856
- [24] GHILOUFI W, BUEDEL B, CHAIEB M. Effects of biological soil crusts on a Mediterranean perennial grass (*Stipa tenacissima* L.)[J]. *Plant Biosystems*, 2017, 151(1): 158-167
- [25] 张瑞, 周晓兵, 张元明. 生物土壤结皮对温带荒漠植物凋落物分解的影响[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 151-158
- ZHANG R, ZHOU X B, ZHANG Y M. Affects of biological soil crusts on litter decomposition in the Gurbantunggut Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 151-158
- [26] 吉雪花, 王露洁, 庞胜群. 蛇麻黄浸提液对苔藓结皮生长的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 187-193
- JI X H, WANG L J, PANG S Q. Effect of *Ephedra distachya* extracts on moss crust growth[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 187-193
- [27] BELNAP J, HARPER K T. Influence of cryptobiotic soil crusts on elemental content of tissue of two desert seed plants[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1995, 9(2): 107-115
- [28] 王彦峰, 肖波, 汪万福, 等. 黄土高原北部水蚀风蚀交错区苔藓多样性及苔藓结皮发育的微生物特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1729-1737
- WANG Y F, XIAO B, WANG W F, et al. Bryophyte diversity and microhabitat characteristics of bryophyte-dominated biological soil crusts development in water-wind erosion crisscross region of the northern Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1729-1737
- [29] 程才, 李玉杰, 张远东, 等. 石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9234-9244
- CHENG C, LI Y J, ZHANG Y D, et al. Effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics in karst rocky desertification region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9234-9244
- [30] 张国秀, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 621-628
- ZHANG G X, ZHAO Y G, XU M X, et al. Impacts of biological soil crust on availability of phosphorus and phosphatase activity in hilly regions of the Loess Plateau, China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 621-628
- [31] ELBERT W, WEBER B, BURROWS S, et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 459-462
- [32] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019
- ZENG D H, CHEN G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 1007-1019
- [33] 李兆光, 杨文高, 和桂青, 等. 滇西北藜麦氮磷钾生态化学计量特征的物候期动态[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(5): 724-732
- LI Z G, YANG W G, HE G Q, et al. Phenological dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium stoichiometry in *Chenopodium quinoa* in northwest Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(5): 724-732
- [34] BOWKER M A, MAESTRE F T, ELDRIDGE D, et al. Biological soil crusts (biocrusts) as a model system in community, landscape and ecosystem ecology[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(7): 1619-1637
- [35] 张雨虹, 张韶阳, 张树辉, 等. 毛乌素沙地苔藓结皮对沙化土壤性质和细菌群落的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1585-1597
- ZHANG Y H, ZHANG S Y, ZHANG S H, et al. Effect of moss crust on sandy soil properties and bacterial community in mu us sandy land [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1585-1597

- 1585-1597
- [36] 吴珠媛,辛濛濛,刘宇涵,等. 小兴安岭主峰平顶山苔藓植物多样性及垂直分布研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020,35(2):309-317
- WU Z Y, XIN M M, LIU Y H, et al. Studies on the diversity and vertical distribution of bryophytes in Pingdingshan of Xiaoxing'an Ling [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2020,35(2):309-317
- [37] 吴楠,张元明,张静,等. 生物结皮恢复过程中土壤生态因子分异特征[J]. 中国沙漠,2007,27(3):397-404
- WU N, ZHANG Y M, ZHANG J, et al. Differentiation of soil variables in different succession stages of biological soil crusts in Gurbantungut Desert, northern Xinjiang, China [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(3):397-404
- [38] MAESTRE F T, ESCOLAR C, LADRON DE GUEVARA M L, et al. Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands [J]. Global Change Biology, 2013, 19(12):3835-3847
- [39] BENGTON P, BENGTON G. Rapid turnover of DOC in temperate forests accounts for increased CO₂ production at elevated temperatures [J]. Ecology Letters, 2007, 10 (9): 783-790
- [40] 刘政,索沛衡,轩寒风,等. 南方红壤侵蚀区马尾松林植被恢复对土壤氮有效性和微生物量碳、氮季节动态的影响[J]. 生态学报,2025,45(5):2094-2103
- LIU Z, SUO P H, XUAN H F, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and microbial biomass carbon, nitrogen along restoration ages of *Pinus massoniana* plantations in red soils erosion region at Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5):2094-2103
- [41] 刘朝红,周晓兵,陆永兴,等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮对土壤氮库垂直分布特征的影响[J]. 生态学报,2023,43(12):5005-5016
- LIU C H, ZHOU X B, LU Y X, et al. Effects of biological soil crusts on vertical distribution of soil nitrogen pools in the Gurbantungut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5005-5016
- [42] ZHANG D D, WU J J, YANG F, et al. Linkages between soil organic carbon fractions and carbon-hydrolyzing enzyme activities across riparian zones in the Three Gorges of China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):8433
- [43] LEBRUN J D, TRINSOUTROT-GATTIN I, VINCESLAS-AKPA M, et al. Assessing impacts of copper on soil enzyme activities in regard to their natural spatiotemporal variation under long-term different land uses [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49:150-156
- [44] WU J Q, WANG H Y, LI G, et al. Vegetation degradation impacts soil nutrients and enzyme activities in wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1):21271
- [45] ZHANG W, ZHANG G S, LIU G X, et al. Bacterial diversity and distribution in the southeast edge of the Tengger Desert and their correlation with soil enzyme activities [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(11):2004-2011
- [46] LIU Y M, YANG H Y, LI X R, et al. Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in revegetated areas of the Tengger Desert, China [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 80:6-14
- [47] XIAO B, VESTE M. Moss-dominated biocrusts increase soil microbial abundance and community diversity and improve soil fertility in semi-arid climates on the Loess Plateau of China [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 117:165-177
- [48] LIU Y M, XING Z S, YANG H Y. Effect of biological soil crusts on microbial activity in soils of the Tengger Desert (China) [J]. Journal of Arid Environments, 2017, 144:201-211
- [49] ZHANG Y L, CHEN L J, CHEN X H, et al. Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land [J]. Catena, 2015, 133:64-70
- [50] BROCKETT B F T, PRESCOTT C E, GRAYSTON S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1):9-20

(责任编辑 付 宸)